

doi: 10.3969/j.issn.1006-1576.2010.02.011

航空发动机双转子系统的模态分析

申苗¹, 唐驾时¹, 李克安², 梁翠香¹, 陈勇³, 隋雪冰³

(1. 湖南大学 力学与航空航天学院, 湖南 长沙 410082; 2. 湖南理工学院 机械与电气工程系, 湖南 岳阳 414000; 3. 沈阳黎明航空发动机(集团)公司, 辽宁 沈阳 110043)

摘要: 为了更好地了解和掌握发动机固有的振动特性, 利用有限元分析 ANSYS 软件, 对某型发动机双转子系统进行了固有频率及振型计算。通过改变轴承的刚度与原计算结果作对比, 分析轴承刚度的改变对整个系统动力特性的影响。结合振动力学相关理论, 对设计方案进行动力学评价。结果表明, 该方法运算速度快, 输入参数少, 特征值、特征向量求解精度高。

关键词: 双转子; 有限元方法; 模态分析**中图分类号:** V23; N945.12 **文献标识码:** A

Modal Analysis on Dual-Rotor System of Aero-Engine

SHEN Miao¹, TANG Jia-shi¹, LI Ke-an², LIANG Cui-xiang¹, CHEN Yong³, SUI Xue-bing³(1. College of Mechanics & Aerospace, Hunan University, Changsha 410082, China;
2. Dept. of Mechanical & Electrical Engineering, Hunan Institute of Science & Technology, Yueyang 414000, China;
3. Shenyang Liming Aero-Engine (Group) Corporation, Shenyang 110043, China)

Abstract: In order to understand and predominated the inherent vibration characteristics of the engine better, the natural frequencies and vibration mode shapes of the dual-rotor system of Aero-engine are calculated based on the ANSYS program. Compared with the original calculation, the impact by change of stiffness in bearings on the dynamic properties of the whole system is analyzed. Integrated with the mechanical vibration theory, dynamics evaluations for the design are carried out. The results show that the computing speed of this method is fast and the eigenvalue and the eigenvector can be obtained with high precision and few input parameters.

Keywords: Dual-rotor; Finite element method; Modal analysis

0 引言

航空发动机的结构复杂, 在工作中会受到机械激振、气动激振等作用, 使振动问题突出。机械振动产生破坏主要因共振^[1]引起, 当激振频率与系统的某阶固有频率接近时, 振幅会急剧增大, 从而产生严重后果。因此, 各阶固有频率和振型是结构承受动力荷载设计中的重要参数, 所以必须对发动机的动力学特性^[2-4]进行研究。目前, 对航空发动机转子系统的研究集中在相对简单的单转子系统上, 对复杂的双转子系统研究得很少。大型有限元分析软件 ANSYS^[5-8]是结构动力学分析常用的软件。故利用 ANSYS 计算了某型发动机双转子系统的固有频率和振型, 研究轴承刚度的改变对系统动力特性的影响, 并结合其工况对设计方案进行动力学评价。

1 双转子系统有限元分析模型的建立

双转子系统具有传统的盘鼓结构^[9], 在各级盘上附有发动机的叶片。系统由低压转子和高压转子组成。低压转子主要包括低压压气机、低压涡轮。

高压转子主要包括高压压气机、高压涡轮。高低压转子间通过 2 个滚动轴间轴承连接。整个系统又通过多个轴承与外部的静子机匣相连。航空发动机的转子系统非常复杂, 影响转子动力特性的因素也很多, 在建模过程中关键是要考虑各种主要因素的影响^[10]。针对转子的结构特点, 确定建模方案如下:

1) 质量是影响固有频率的主要因素之一, 因此, 建模时应尽可能地接近实物模型的实际尺寸, 但一些细小的结构如倒角、螺孔可以忽略。主要部件的材料参数也尽量保持与实际情况相符。

2) 轴承只考虑径向刚度, 刚度值取测试得到的静刚度值。轴承在 ANSYS 中用弹簧模拟。

3) 考虑到叶片的颤振对模态分析结果的影响, 将各级叶片按质量等效到各级盘上。为使模型尽可能精确, 采用 ANSYS 对其进行三维实体建模, 模型主要采用 SOLID45 单元建立。再对各个部件定义材料属性划分网格, 将轴承简化为弹簧作为边界条件施加于模型上, 2 个轴间轴承简化得到的弹簧连接高低压轴, 与机匣相连的轴承简化得到的弹簧一

收稿日期: 2009-09-21; 修回日期: 2009-10-26

基金项目: 国家自然科学基金资助项目 (10672053)

作者简介: 申苗 (1985-), 女, 硕士, 从事一般力学与力学基础、非线性动力学研究。

端与双转子系统相连, 另一端固支, 轴承刚度均使用静刚度。得到有限元分析模型如图 1。

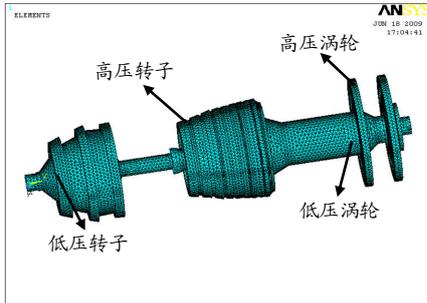


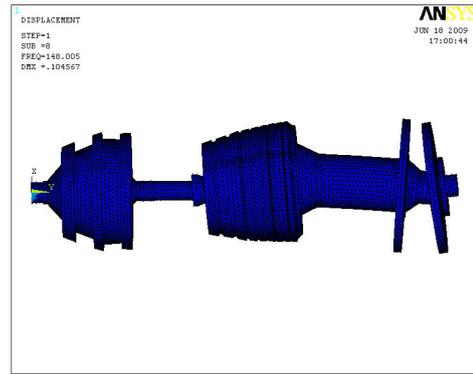
图 1 双转子系统有限元分析模型

2 模态计算与分析

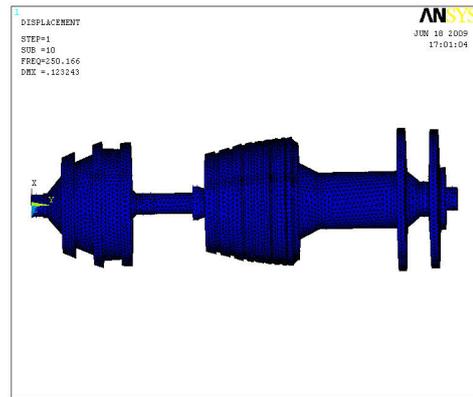
采用子空间法 (Subspace) 计算双转子系统的模态, 该方法运算速度快, 输入参数少, 特征值、特征向量求解精度高。由振动理论可知, 对于一个多自由度振动系统, 系统低阶固有频率就能反映系统的动态特性。在双转子系统的振动中, 低阶模态起主导作用, 高阶模态的影响较小。计算得双转子系统的前六阶固有频率如表 1, 相应的振型如图 2。

表 1 双转子系统震动的前六阶固有频率

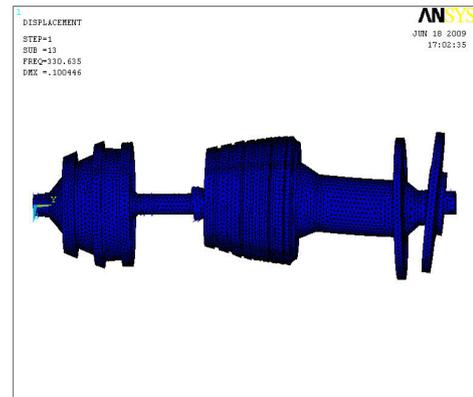
阶次	1	2	3
固有频率(Hz)	51.681	105.60	148.01
阶次	4	5	6
固有频率 (Hz)	250.17	330.63	380.40



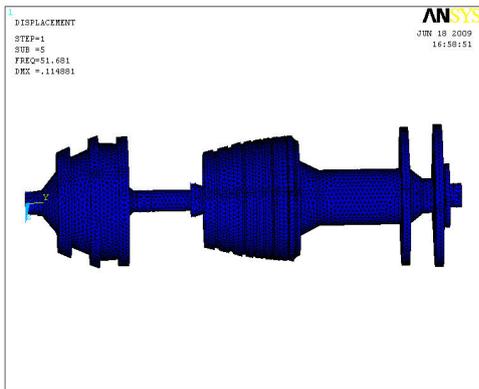
(c) 阶振型



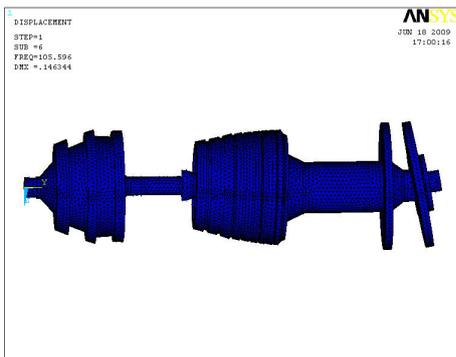
(d) 阶振型



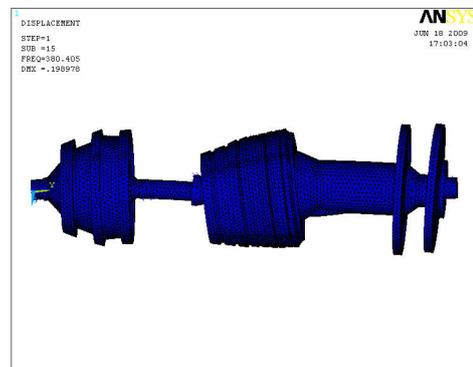
(e) 阶振型



(a) 阶振型



(b) 阶振型



(f) 阶振型

图 2 振型图

分析计算固有频率和相应的振型, 结论如下:

1) 模态计算的结果与试验结果相符合。

2) 当外部激励的频率接近表 1 中数值时,会产生较大振幅,使结构受到损害,因此,必须通过修改设计,改变共振出现的频率范围,以提高发动机运行过程的平稳性。

3) 第 1、4 阶固有振型主要是扭转振动,其中,第 1 阶主要是低压转子的扭振;第 4 阶主要是高压转子的扭振。第 2、5、6 阶固有振型主要是垂直面内的弯振,其中,第 2 阶主要是低涡盘和高压压气机在垂直面内的弯振,高压压气机的振幅相对较小;第 5 阶主要是高压压气机和 2 个涡轮盘在垂直面内的弯振,低压压气机也有相对很小的振动;第 6 阶是整个双转子系统在垂直面内的弯振。第 3 阶固有振型主要是高压压气机和 2 个涡轮盘在水平面内的弯振,低压压气机也有相对很小的振动。

4) 前四阶固有频率虽然出现的可能性大,但频率值低,远远没达到双转子系统的共振频率,后两阶固有频率值相对比较接近系统的共振频率,但由于阶数高,出现的可能性不大。

3 轴承刚度变化对模态分析的影响

转子高速运转时,轴承的刚度发生改变,故要考虑轴承的动刚度。目前,还没有可靠的方法来得到准确的轴承动刚度值,故计算时用增大和缩小静刚度值来分析轴承刚度对模态计算的影响。将轴承刚度值减小 20% 和增加 20%,计算双转子系统的前六阶固有频率,结果如表 2 (其中 B 组为对照组)。

表 2 不同轴承刚度对应的双转子系统振动的固有频率

	固有频率(Hz)		
	1	2	3
A	51.681	102.55	144.89
B	51.681	105.60	148.01
C	51.680	88.306	130.21
	4	5	6
A	250.17	314.76	368.24
B	250.17	330.63	380.40
C	188.70	224.94	250.17

1) 若转子高速运转时,轴承的刚度值缩小了,从表 2 中可以看出,双转子系统振动的固有频率均变小了,第 1、4 阶扭振不受影响。第 5、6 阶固有频率改变较大,第 2、3 阶固有频率变化不大。

2) 转子高速运转时轴承的刚度值增大,从表 2 中可以看出,第 1 阶扭振频率大小不受影响。第 2、3、4、5、6 阶固有频率变小了,第 2 阶扭振的出现由原来的总体阶数第 4 阶推迟到总体阶数的第 6 阶。

3) 该结果能用来间接地分析轴承动刚度对双转子系统振动固有频率的影响,定性研究轴承刚

度的改变使双转子系统振动特性发生的变化。

4 结论

1) 建模时,使用简化方案,且模型主要采用三维 SOLID45 单元,使得模型更接近于实物,为对双转子系统进行准确的模态分析提供了有力的保证。

2) 在使用轴承静刚度时,得到前四阶固有频率值较小,故在发动机启动速度推进时,就尽量地在这些频率对应的转速处迅速推过,达到避开共振的效果,使双转子系统迅速进入稳定工作状态。而后两阶固有频率对应的临界转速虽然比较接近发动机的转速,但因是高阶频率,故出现的可能性极小。

3) 改变轴承的刚度值会引起双转子系统固有频率的变化,故当临界转速接近或处于工作区域时,可通过改变轴承的刚度来降低或提高系统的固有频率,使临界转速避开工作区域。可定性研究轴承刚度的改变对双转子系统振动特性的影响。转子高速运转时,轴承的刚度会改变,在还没有一种可靠的方法来得到准确的轴承动刚度值之前,可以考虑用增大和缩小静刚度值来近似模拟动刚度值,并将计算结果作为转子高速运转时的动力特性的参考。

参考文献:

- [1] 刘廷柱, 陈文良, 陈立群. 振动力学[M]. 北京: 高等教育出版社, 1998.
- [2] 王娅卫, 任兴民, 秦卫阳, 等. 转子系统动力特性分析[J]. 机械科学与技术, 2002, 21(1): 49-51.
- [3] 王云, 雷娜. 旋转冲压发动机冲压转子振动模态分析[J]. 南昌航空大学学报, 2008, 22(2): 22-25.
- [4] Wu JJ, Whittaker A R, Cartmell M P. Dynamic Responses of Structures to Moving Bodies Using Combined Finite Element and Analytical Meth[J]. International Journal of Mechanical Sciences, 2001, 43(11): 2555-2579.
- [5] 王呼佳, 陈洪军. ANSYS 工程分析进阶实例[M]. 北京: 中国水利水电出版社, 2006.
- [6] 李浩月, 周田朋, 刘相新. ANSYS 工程计算应用教程[M]. 北京: 中国铁道出版社, 2003.
- [7] 王富耻, 张朝辉. ANSYS 10.0 有限元分析理论与工程应用[M]. 北京: 电子工业出版社, 2006.
- [8] 李泽天, 王兴伟, 李小飞. 基于 ANSYS 的轴承座有限元分析[J]. 兵工自动化, 2008, 27(12): 94-96.
- [9] 张文. 转子动力学理论基础[M]. 北京: 科学出版社, 1990.
- [10] Masaharu Shinozaki, Osamu Funatagawa, Masao Kobayashi. Study of stator structure modeling for rotor dynamic analysis[J]. Proceedings of ASME Turbo Expo, 2001(6): 4-7.
- [11] 吴石, 陈伟, 黄亮, 等. ADAMS 软件解决传动轴十字轴总成烧蚀质量问题的分析[J]. 四川兵工学报, 2008(4): 51-53.